

Cálculo dos coeficientes de absorção energética de dez materiais para utilização em tomografia computadorizada

C. C. Ferreira¹; A. F. Maia¹; R. E. M. Ximenes¹; C. A. B. Garcia²

¹Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil

²Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil

ccosta@fisica.ufs.br

(Recebido em 01 de setembro de 2009; aceito em 01 de novembro de 2009)

A dosimetria do feixe de raios X é um dos testes de controle de qualidade mais importantes para garantir a segurança do uso da radiação ionizante em aplicações médicas. Para realização dos procedimentos dosimétricos, geralmente, é necessário a utilização de um objeto simulador, que possibilite estimar a dose no paciente. Portanto, o objetivo desse trabalho foi calcular os coeficientes de absorção energética de alguns materiais disponíveis localmente para estudar a viabilidade de utilização deles na confecção de objetos simuladores da cabeça para feixes de raios X de tomografia computadorizada.

Materiais de baixo custo foram escolhidos para tentar reproduzir as características físicas da cabeça humana. São eles: bólus, parafina, acrílico, breu, massa de modelar, nylon, cera de articulação e cera de abelha. Logo após o cálculo dos coeficientes de absorção energética, os resultados foram analisados e comparados com os cérebros de referência da ICRU (Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação) e da ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica). Os gráficos e tabelas comparativos mostraram que o material que apresentou os melhores resultados foi a massa de modelar.

Palavras-chave: Objeto Simulador, Tomografia Computadorizada, Dosimetria

Dosimetry of X rays beams is an important test quality control to ensure the safety of using ionizing radiation in medical applications. The execution of dosimetric procedures is generally related to simulators objects that make possible to estimate the dose received by the patient. Therefore the main objective of this study was to calculate the mass energy-absorption coefficient for ten materials locally available to investigate the viability of using these materials in human brain simulators objects for X rays beams in computed tomography.

Materials with low cost were chosen to reproduce physical characteristics of human brain. These materials are: bolus, paraffin, PMMA, pitch, modelling clay, Nylon®, articulation wax and bee wax. Immediately after the obtaining of mass energy-absorption coefficient, they were analyzed and compared ICRU's (International Commission on Radiation Units and Measurements) brain and ICRP's (International Commission on Radiological Protection) brain. Graphs and tables used in the comparison showed that the material which had the best results were the modeling clay.

Keywords: simulators objects, modelling clay, dosimetry

1. INTRODUÇÃO

De acordo com os princípios de justificação, não se deve expor um ser humano às radiações ionizantes sem que a prática produza um benefício para o indivíduo exposto e para a sociedade [1]. Portanto, é inadequado realizar estudos com seres humanos sem a prévia autorização do comitê de ética. Sendo assim, torna-se necessário a confecção de objetos simuladores.

Os objetos simuladores devem ser caracterizados ou construídos segundo a sua aplicação. Eles devem apresentar características semelhantes aos tecidos que se destinam a simular. Por exemplo, para aplicações dosimétricas, que envolvem feixes de raios X, o melhor caminho para caracterizar um material tecido equivalente é através do cálculo do coeficiente de absorção energética na faixa de energia desejada. Já para aplicações que envolvem atenuação dos feixes de raios X, o cálculo dos coeficientes de atenuação linear são recomendados [2,3].

Diversos trabalhos têm descrito o uso de materiais tecido equivalente para uso em dosimetria e controle de qualidade, desde a área de radiodiagnóstico até a área de radioterapia [4,5,6]. Em 2003, Jones *et. al.* desenvolveram materiais tecido equivalente para simular o tecido ósseo, tecido mole e tecido pulmonar em pacientes recém-nascidos, crianças e adultos em exames de tomografia computadorizada (TC) [4]. Em particular, os coeficientes de absorção energética mostraram que esses materiais são bons substitutos desses tecidos para uso em dosimetria de TC [4]. Em 2005, Kinase *et. al.* conduziram um estudo similar, onde desenvolveram materiais tecido equivalente para simular vários órgãos e tecidos do corpo humano, inclusive o cérebro, para uso em aplicações com radionuclídeos [5]. A validação foi conduzida através do cálculo dos coeficientes de atenuação linear na faixa de energia de 8 keV a 10 MeV [5]. Em 2009, Zachary *et. al.* caracterizaram uma espuma muito utilizada em construção de aeronaves, automóveis e outros produtos do gênero, para uso como material tecido equivalente do tecido pulmonar em exames de TC [6]. Tal material foi caracterizado em termos da sua Unidade Hounsfield (ou HU em inglês) [6].

O objetivo deste trabalho é caracterizar materiais de baixo custo e fácil acesso para a confecção de objetos simuladores do cérebro humano para dosimetria em feixes de tomografia computadorizada. Para determinar qual material é o melhor tecido equivalente do cérebro humano, os coeficientes de absorção energética foram calculados e comparados aos coeficientes de absorção energética dos tecidos cerebrais de referência dados pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação (ICRU) e também pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP). Os materiais usados foram: cera de abelha, massa de modelar, cera de articulação vermelha, cera de articulação laranja, nylon, acrílico, bólus, breu, parafina tipo I, parafina tipo II.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Calculamos os coeficientes de absorção energética dos dez materiais (cera de abelha, massa de modelar, cera de articulação vermelha, cera de articulação laranja, nylon, acrílico, bólus, breu, parafina tipo I, parafina tipo II), através da equação abaixo (desenvolvida por Hubbell e Seltzer [3]) que define este coeficiente.

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{MaterialTE} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i \quad (1)$$

Onde o lado esquerdo da (Eq. 1) é o coeficiente de absorção energética do material tecido equivalente (amostra), w_i é a fração elementar dos elementos constituintes do material. E por último, $(\mu_{en}/\rho)_i$ é o coeficiente de absorção energética de cada elemento constituinte, valor que depende da energia do fóton e do elemento que compõe o composto ou material. Tecido equivalente.

Para se obter o w_i de cada elemento em todos os materiais analisados, foram feitas medidas da massa de Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S) presentes em cada amostra. Como os materiais analisados são essencialmente orgânicos [7], os cálculos de coeficiente de absorção energética levaram em consideração somente os elementos citados. A figura 1 mostra o equipamento utilizado para realização das medidas da massa dos elementos citados em cada amostra ou material.



Figura 1. Flash EA 1112 series. Aparelho disponível no Departamento de Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Após colocar cada amostra no recipiente adequado para determinação da massa dos elementos citados acima, foi definida uma temperatura de combustão. A partir de então, a amostra sofre combustão e libera gases constituídos pelos elementos C, H, N e S. Esses gases se recombinaem com gases mantidos em uma atmosfera específica, produzindo óxidos. Através desses óxidos formados e de sua massa, é possível estimar a massa de cada elemento presente em cada amostra. Como a massa inicial de cada amostra é conhecida, é possível também estimar o percentual dos elementos presentes em cada amostra.

Para os materiais analisados, foram feitas duas análises de composição elementar, com duas temperaturas diferentes: 900 °C e 1100 °C.

Os coeficientes de absorção energética de cada elemento foram obtidos através das tabelas publicadas pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) [8] para a faixa de energia de 10 a 150 keV. Em seguida, foram calculados os coeficientes de absorção energética de cada amostra, para cada energia, através da equação 1.

De forma similar, foram calculados os coeficientes de absorção energética para o tecido cerebral especificado pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação (ICRU) e pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) para comparação e determinação do melhor material para simular as características dosimétricas do tecido cerebral humano.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra os percentuais elementares de cada amostra para a temperatura de combustão de 900 °C. A massa do Oxigênio (O) foi considerada como a diferença entre a massa inicial e a soma das massas dos demais elementos. Por exemplo, para a massa de modelar, temperatura de combustão de 900 °C, a soma dos percentuais de todos os elementos é 21,34% (ver tabela 1), portanto o percentual de oxigênio da massa de modelar é de 78,66%. E assim foi feito para todos os materiais e para a temperatura de combustão de 1100 °C.

Tabela 1. Percentual de elementos químicos em cada amostra para temperatura de combustão igual a 900°C.

Temperatura de combustão 900°C					
Amostra	Percentual Elementar (%)				
	N	C	H	S	O
Massa de Modelar	0,86	19,76	0,72	0,00	78,66
Parafina 1	0,74	81,73	0,61	0,10	16,82
Nylon	1,34	59,49	0,63	0,00	38,54
Cera vermelha	1,23	80,17	2,36	0,09	16,15
Parafina 2	0,63	79,61	4,68	0,14	14,94
Bólus	0,78	82,22	1,50	0,09	15,41
Cera laranja	0,37	82,01	2,73	0,08	14,81
Cera de abelha	0,42	75,25	1,87	0,00	22,46
Breu	0,42	42,18	0,19	0,00	57,21
Acrílico	1,71	86,19	0,24	0,10	11,76

A seguir, a tabela 2 mostra os percentuais elementares de cada amostra para a temperatura de combustão de 1100 °C.

Tabela 2. Percentual de elementos químicos em cada amostra para temperatura de combustão igual a 1100°C.

Temperatura de combustão 1100°C					
Amostra	Percentual Elementar (%)				
	N	C	H	S	O
Massa de Modelar	0,60	21,18	1,02	0,00	77,20
Parafina 1	0,62	88,03	0,84	0,11	10,40
Nylon	1,10	63,34	0,75	0,00	34,81
Cera vermelha	0,78	88,16	2,52	0,00	8,54
Parafina 2	0,75	82,21	4,97	0,07	12,00
Bólus	0,66	88,24	1,82	0,09	9,19
Cera laranja	0,63	85,36	2,38	0,12	11,51
Cera de abelha	0,87	78,22	1,61	0,00	19,30
Breu	0,61	49,25	0,55	0,00	49,59
Acrílico	1,09	87,08	0,47	0,07	11,29

Neste texto, para evitar o excesso de tabelas, somente serão apresentados os coeficientes de absorção energética da massa de modelar. A tabela 3 mostra os coeficientes de absorção energética da massa de modelar, do tecido cerebral da ICRU e do tecido cerebral da ICRP para a temperatura de combustão de 900 °C e para a faixa de energia de 10 a 150 keV.

Tabela 3. Coeficientes de absorção energética da massa de modelar, do cérebro da ICRU e do cérebro da ICRP para temperatura de combustão de 900 °C.

Energia (KeV)	Massa de Modelar (cm²/g)	Cérebro da ICRU (cm²/g)	Cérebro da ICRP (cm²/g)
10	5,187	5,411	5,446
15	1,617	1,710	1,721
20	0,776	0,828	0,833
30	0,353	0,381	0,383
40	0,249	0,270	0,271
50	0,209	0,227	0,228
60	0,189	0,206	0,207
80	0,167	0,183	0,184
100	0,155	0,170	0,171
150	0,137	0,150	0,150

A tabela 4 mostra os coeficientes de absorção energética da massa de modelar, do tecido cerebral da ICRU e do tecido cerebral da ICRP para a temperatura de combustão de 1100 °C e para a faixa de energia de 10 a 150 keV.

Tabela 4. Coeficientes de absorção energética da massa de modelar, do cérebro da ICRU e do cérebro da ICRP para temperatura de combustão de 1100 °C.

Energia (KeV)	Massa de Modelar (cm ² /g)	Cérebro da ICRU (cm ² /g)	Cérebro da ICRP (cm ² /g)
10	5,126	5,411	5,446
15	1,600	1,710	1,721
20	0,769	0,828	0,833
30	0,351	0,381	0,383
40	0,248	0,270	0,271
50	0,209	0,227	0,228
60	0,189	0,206	0,207
80	0,168	0,183	0,184
100	0,156	0,170	0,171
150	0,137	0,150	0,150

As figuras 2 e 3 mostram os gráficos das razões entre os coeficientes de absorção energética da massa de modelar e os coeficientes de absorção energética do tecido cerebral da ICRU e da ICRP. Os gráficos foram obtidos para as duas temperaturas de combustão.

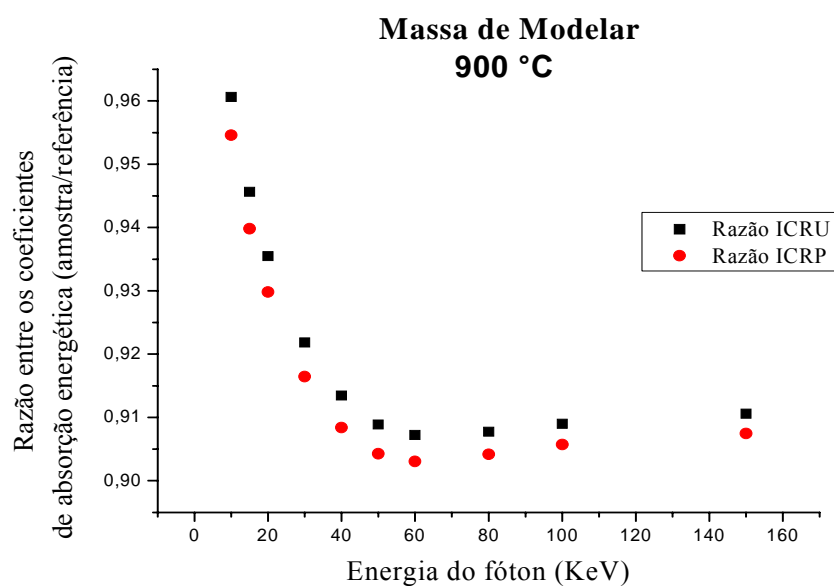


Figura 2. Razão entre os coeficientes de absorção energética da massa de modelar e dos tecidos de referência. Temperatura de combustão de 900°C.

Para a massa de modelar, em valores mais baixos de energia, a razão dos coeficientes de absorção energética se aproximam mais do valor ideal, que é igual a 1. Mesmo para as energias mais altas, ainda assim as razões são muito próximas de 1, mostrando uma boa concordância entre os coeficientes de absorção energética calculados para a massa de modelar e os coeficientes de absorção energética calculados para os tecidos cerebral da ICRU e da ICRP. O mesmo comportamento pode ser visto para a temperatura de combustão de 1100°C. Isso indica o uso da massa de modelar como um material tecido equivalente do tecido cerebral humano.

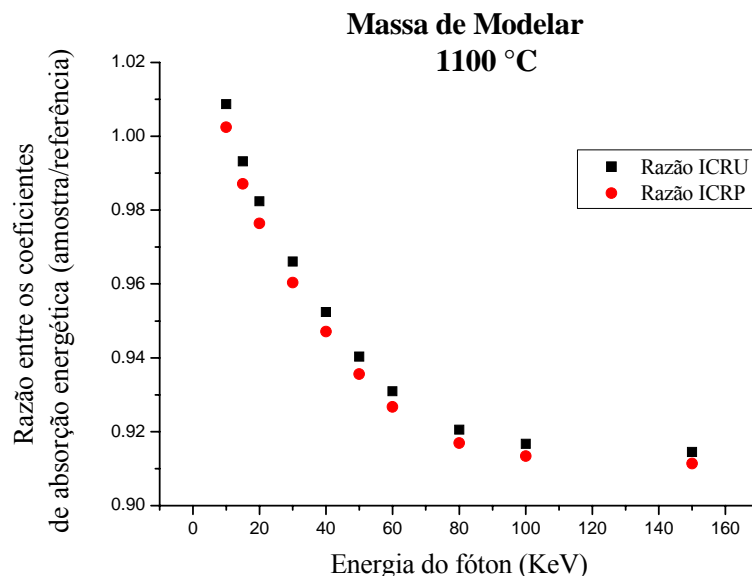


Figura 3. Razão entre os coeficientes de absorção energética da massa de modelar e dos tecidos de referência. Temperatura de combustão de 1100°C.

As diferenças percentuais entre os coeficientes de absorção energética de cada material e os coeficientes de absorção energética do tecido cerebral da ICRU e da ICRP foram calculadas para cada energia. Em seguida, foi calculada, para cada material, a média das diferenças percentuais no intervalo de energia de 10 a 150 keV. As tabelas 5 e 6 mostram as médias das diferenças percentuais entre os coeficientes de absorção calculados dos materiais analisados e os coeficientes de absorção energética do tecido cerebral da ICRU e da ICRP. A média foi calculada sobre o intervalo de energia de 10 a 150 keV.

Tabela 5. Média das diferenças percentuais entre os coeficientes de absorção energética das amostras e os coeficientes de absorção energética dos dois tecidos de referência. A temperatura de combustão foi de 900 °C.

Materiais tecido equivalente	Média das diferenças percentuais absolutas (amostra/ICRU)	Média das diferenças percentuais absolutas (amostra/ICRP)
Cera de abelha	32,680	32,352
Cera vermelha	34,586	34,269
Parafina 1	34,502	34,184
Bólus	35,089	34,775
Nylon®	25,637	25,269
Cera laranja	35,407	35,096
Massa de modelar	8,262	7,795
Acrílico	36,574	36,268
Breu	17,721	17,307
Parafina 2	34,682	34,367

Tabela 6. Média das diferenças percentuais entre os coeficientes de absorção energética das amostras e os coeficientes de absorção energética dos dois tecidos de referência. A temperatura de combustão foi de 1100 °C.

Materiais tecido equivalente	Média das diferenças percentuais absolutas (amostra/ICRU)	Média das diferenças percentuais absolutas (amostra/ICRP)
Cera de abelha	33,996	33,676
Cera vermelha	38,610	38,316
Parafina 1	37,229	36,927
Bólus	37,783	37,485
Nylon®	27,289	26,931
Cera laranja	36,546	36,240
Massa de modelar	5,274	4,916
Acrílico	34,485	34,167
Breu	20,968	20,573
Parafina 2	36,383	36,097

Os resultados apresentados nas tabelas 5 e 6 confirmam o comportamento observado nas figuras 1 e 2. Dentre todos os materiais analisados, a massa de modelar apresenta a menor diferença percentual média (aproximadamente 5%). Isso mostra que uma dosimetria realizada com um objeto simulador construído com massa de modelar introduzirá um erro substancialmente menor do que uma dosimetria realizada com objetos simuladores construídos com outros materiais, pois as médias das diferenças percentuais para os outros materiais estão acima de 20%.

É necessário ressaltar que os coeficientes de absorção energética calculados para a temperatura de 1100 °C são considerados mais acurados, pois a essa temperatura, a amostra sofre uma combustão mais intensa, gerando assim mais gases que se tornarão óxidos e, portanto a máquina da figura 1 pode oferecer um resultado mais preciso.

4. CONCLUSÃO

Com base na tabela 6 e em todos os outros métodos utilizados para se fazer as análises, o melhor material dentre esses escolhidos para se construir um objeto simulador, nesse intervalo de energia, é a massa de modelar, pois apresenta os menores desvios dos valores dos tecidos de referência. Medidas dosimétricas com um objeto simulador construído com massa de modelar serão comparadas a medidas dosimétricas em objetos simuladores de acrílico e a objetos simuladores antropomórficos. Cálculos computacionais (Monte Carlo) auxiliarão na caracterização desse material para uso dosimétrico.

1. TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; PRINZIO, R.; PRINZIO, A.R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 4ª Revisão. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), 2002.
2. ATTIX, F. H., *Introduction on radiological physics and radiation dosimetry*, 2nd ed., New York, N.Y: John Wiley & Sons (1986).
3. HUBBELL J H; SELTZER S M; 1995 Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, *National Institute of Standards and Technology*.
4. JONES A K; HINTENLANG D E; BOLCH W E 2003 *Tissue-equivalent materials for construction of tomographic dosimetry phantoms in pediatric radiology* Med. Phys. **30** 2072-2081
5. KINASE A.; KIMURA M.; NOGUCHI H.; YOKOYAMA S.; *Development of lung and soft tissue substitute for photons*, Japan Atomic Energy Research Institute, 2005
6. LEVINE Z.; LI M.; REEVES A.; *A low-cost density reference phantom for computed tomography*, 2009 American Association of Physicists in Medicine.

-
7. ICRU 1989 Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement *ICRU Report 44*
International Commission on Radiation Units and Measurements Bethesda, MD, USA
 8. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>